

伸張性運動による筋損傷が運動機能に与える影響

遠藤 隆志^[1] 植草学園大学発達教育学部

齋藤基一郎^[2] 植草学園大学保健医療学部

伸張性筋収縮を含む運動を行うと筋に微細な損傷が生じ、それが基になって遅発性筋痛（DOMS）が数時間後に発症する。最近の研究では、この筋損傷はDOMSや筋の腫れを引き起こすのみでなく、最大発揮筋力および関節可動域の減少の原因にもなり、ヒトの様々な運動機能に影響を及ぼすことが明らかにされた。本研究では、伸張性運動による筋損傷（EIMD）が運動機能へ与える影響の解明およびさらなる理解へ繋げるために、a) 最大筋力発揮およびその持続、b) 最大下筋収縮および力発揮感覚、c) 運動学習、d) 両側同時運動、とEIMDに関する最近の研究を中心にまとめた。これらのEIMDによる運動機能の低下に関する詳細なメカニズムを解明するためにさらなる研究を行う必要もあるが、体育・スポーツやリハビリテーション医療の現場における不慮の怪我や事故を未然に防止するためにも、様々な運動機能の低下に繋がる伸張性運動の扱い方には十分留意すべきである。

キーワード：筋損傷，伸張性運動，運動機能，力発揮，運動制御

1. はじめに

不慣れな運動や久しぶりにスポーツをした際、その運動から数時間経過後に筋に痛みが発現し、1～2日後にその痛みはピークに達し、1週間程度で自然消失する。これを遅発性筋痛（delayed onset muscle soreness；DOMS）と言う¹⁻⁴⁾。このDOMSについては、ほとんどの人が経験しており、広く認知されている⁵⁾。これまでの研究より、階段を下りる時やジャンプ後の着地時の大腿四頭筋、ビールジョッキをゆっくりとテーブルの上に置くときの上腕二頭筋、およびベンチプレスでバーベルを下す時の大胸筋の活動にみられるように、筋が収縮しながらも引き伸ばされる伸張性筋収縮（eccentric contraction；ECC）が繰り返し行われることによって筋の微細構造および細胞骨格に損傷が生じることが明らかになっている^{6,7)}。このECCによる筋損傷（exercise-induced muscle damage；EIMD）がDOMSの主たる要因であることは多くの研究にて報告され

ている⁶⁻⁸⁾。このDOMSの発生メカニズムとその特徴、および筋損傷とトレーニング後の筋肥大の関係について多くの研究と秀逸なレビューがあるのでそちらを参照されたい^{2-4,6-9)}。

EIMD後において、その炎症・修復過程で筋の腫張やDOMSが生じること以外にも、長期間にわたる最大筋力発揮（maximal voluntary contraction；MVC）の低下、関節可動域の減少、およびトルク-関節角度曲線における筋力発揮至適角度の伸長が生じることが報告され、これらのことが様々な運動機能にも影響を及ぼす可能性が示唆されている^{1-4,6-8)}。近年の研究より、EIMDは他にも筋疲労、最大下筋収縮、力発揮感覚、運動学習などといった多くの運動機能に影響を及ぼすことが明らかにされた¹⁰⁻¹⁶⁾。EIMDおよびDOMSは1週間ほどで自然に完治するため、これまで医学および生理学的にあまり注意を払われてこなかったが、これらによる運動機能の低下は、運動機能の向上や回復を目的とする体育・スポーツやリハビリテーション医学に多大な影響を

[1] 著者連絡先：遠藤 隆志

[2] 齋藤基一郎

与えることが考えられる。そこで、本総説では、近年報告された論文を中心にEIMDが運動機能に与える影響についてまとめ、その生理学的メカニズムの解明など本研究分野のさらなる展開へ繋げることを目的とする。

EIMDが引き起こされると、早い場合で運動終了8時間後にその損傷による炎症・修復過程で痛覚関連受容器の感度上昇が生じて、DOMSが発症する¹⁻⁴⁾。従って、EIMDがある状態においては、ほとんどの場合でDOMSが発症した状態にあると考えられる。DOMSは疼痛ではないが運動したり圧をかけたりすることで筋に鈍い痛みが生じるため、その痛みが運動に与える影響が懸念される。実験的に誘発した、もしくは疾病として感じる痛み（疼痛）は複雑に運動制御機構を修飾し、その結果として様々な運動機能に大きな影響を与えることが多くの先行研究で明らかにされている¹⁷⁻²⁰⁾。それゆえ、本論文では、EIMDの生じるECC直後とそれがほとんど生じない短縮性運動（concentric contraction；CON）直後との比較、DOMSのある状態と筋に損傷を引き起こさずに痛みのみを誘発する実験的筋痛との比較、およびDOMSの発症前でECC自体の疲労からの回復するECCの約2時間後に実験を行う、などの方法を用いて、DOMSの影響を可能な限り除外した最近の研究を中心にまとめ、EIMD自体が運動機能に与える影響について考察した。

2. 最大筋力発揮およびその持続

当初よりEIMDおよびDOMSの研究では、ECCの後にはMVCが大きくかつ持続的に低下することがその特徴として報告されてきた³⁾。ECCの負荷強度（最大上もしくは最大下強度）および反復回数などの違いによってもその程度は異なるが、MVCはECC後に60-70%に低下し、この低下は約1週間かけて緩やかに回復する²⁻⁴⁾。ECCの前後において、MVC中に筋への最大上強度の電気刺激もしくは皮質運動野に高強度の経頭蓋磁気刺激（transcranial magnetic stimulation；TMS）を与えて、それらの刺激による外挿単収縮から筋の随意的動員度（voluntary activation；VA、図1参照）を推定した研究がある。これらの結果では、ECCの前後でこの

VAは変化しないことが報告されている^{10, 21)}。このことは、ECCに引き起こされるEIMDおよびDOMSの有無によって中枢による筋の動員度は変わらないこと、すなわちECC後のMVCの低下は主に末梢性の変化によるものであることが示唆される。また、このMVCの低下は、EIMDおよびDOMS、筋の腫脹、および組織の損傷マーカーの一つとして考えられる血漿中のクレアチンキナーゼや γ グロブリンの経時的変化と相関しない^{3, 4, 22)}。これらのことから、MVCの低下がEIMDの程度を評価するために最適な指標であると考えられている²³⁾。一方で、最近Prasartwuthら²⁴⁾は、このVAは、先行研究で報告されていたように肘関節角度が90度付近（至適筋長）ではECC前後で約90%以上の高い数値を保ち、変化が見られないが、より筋長の短い関節角度（60-70度）ではVAはECCの2時間後に約70%にまで大きく低下することを報告している。従って、EIMDには筋や神経筋接合部などの末梢性の要因以外に中枢性に最大筋力発揮を妨げる要因があることが考えられる。しかし、EIMDがどのような機序でVAを低下させるかについて、さらなる中枢神経内の抑制機序の解明が必要である。

上記の研究ではDOMSの発症期間中も定量的計測を行っており、DOMSはVAの低下にあまり影響を及ぼさないと考えられる。一方、痛みはMVCを中枢性に低下させることが知られているため²⁰⁾、DOMSが運動および中枢神経系に与える影響は一般的な痛み（疼痛）とは異なっていることが推測さ

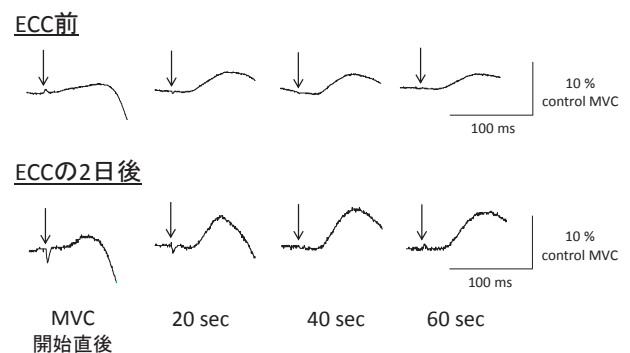


図1 60秒間MVCを持続的に発揮する筋疲労課題開始直後、20、40および60秒後における経頭蓋磁気刺激に誘発された単収縮の変化。矢印は刺激が与えられた時間を示す。文献10より一部改変。

れる。このことは、DOMSが疼痛ではなく、運動を行ったり、筋に圧力を負荷した時にのみ生じる特徴的な痛みであることが考えられるが、この痛みのモダリティーの違いによる影響についてはさらに詳細な研究で明らかにする必要がある。

著者ら¹⁰⁾は、短時間のMVCに加えて、ECCの前後において肘関節屈曲のMVCを60秒間持続的にを行い、その変化を経時的に検討した。その結果、EIMDと共にDOMSを発症しているECCの2日および4日後では、ECC前に比して、持続的MVCが有意に低下することが明らかとなった。この持続的MVC中に被験者の皮質運動野にTMSを与えて算出したVAおよび筋電図量と発揮筋力の比の変化を観察し、その結果、ECCの2日後には神経筋接合部より上位の部位の機能低下が要因とされる中枢性疲労および、それより末梢部の機能低下が要因とされる末梢性疲労の両方が亢進することが明らかになった(図1)。この研究結果は、EIMDだけでなくDOMSも含まれているため、筋を損傷させることなく痛みのみを誘発する高張食塩水(9%)を1ml上腕二頭筋に注入して実験的筋痛を引き起こし、先行研究と同様に60秒間の持続的MVCを行った²⁵⁾。その結果、実験的筋痛群と生理食塩水を1ml注入したコントロール群との間には、持続的なMVCの低下に有意差は認められず、実験的筋痛は中枢性および末梢性疲労には影響を及ぼさないことを明らかにした。また、CONもしくはECCで同じ筋力レベルまで低下させ、その後60秒間の持続的MVCを行った著者らの研究では、CON後に比して、ECC後において持続的MVCの有意な低下および中枢性疲労の増大が認められた²⁶⁾。これらの研究より、DOMSではなく、EIMDに中枢神経系および末梢部の両方の要因より筋疲労を亢進させる効果があることが確かめられた。しかしながら、VAの低下は、皮質運動野よりも上位の運動制御機構の機能不全によるものであることは明らかになっているが、その具体的な部位などは未だ特定されていない。この具体的な経路および機序がさらなる研究において明らかになることが望まれる。

3. 最大下筋収縮および力発揮感覚

ECC後において、MVCだけでなく最大下筋収縮においても運動機能が変化することを示した報告は多い^{12-15, 27-34)}。ECCでEIMDを引き起こした後に静的な最大下筋収縮(MVCの5-80%)を行ったときに、発揮筋力は一定に止まることなく細かな変動を示し、筋の振戦が大きく増大する^{12, 27, 28)}。この振戦の増大は、CONの後には観察されず、ECC後のDOMSの発症前にも認められるため、EIMD特有の運動機能の低下と考えられる。また、この振戦は力をランプ上に漸増させたときにも観察される²⁹⁾。このような筋の振戦がECC後において認められるときには、ECC前後で相対的に同じ強度で筋力を発揮しても、主働筋の筋電図量はECC前の2-4倍に増大する^{12, 28)}。また、この筋電図量の増大は主働筋だけでなく拮抗筋においても観察される¹²⁾。このような筋の振戦および筋電図量の増大に見られる運動制御系の変化は、近年、EIMDの特徴の一つと考えられ、その詳細なメカニズムを明らかにする取り組みが進んでいる。最近の研究より、この筋電図量の増大の背景として、EIMD時に運動単位の発火頻度および同期化の増大および運動単位の活動閾値の低下など脊髄前角 α 運動ニューロンプールの活動が変化することが明らかにされた^{30, 31)}。著者らはECC前後でTMSを用いて運動誘発電位および筋電図消失期間の変化を観察し、EIMD時に認められた皮質脊髄路の興奮性の増大と皮質内抑制の減弱がこのEMG増大の一因であると考えている^{16, 32)}。さらに、最近、PitmanとSemmler³³⁾はTMSの2連発刺激法を用いて、EIMD時に皮質内抑制の減弱が生ずることを示し、その要因が皮質運動野内の脱抑制機構にも存在することを報告している。また、著者らは脳波と筋電図のコヒーレンス解析をECCの前後で行い、EIMDのある時には、一次体性感覚運動野と脊髄前角 α 運動ニューロンプールの活動の同調性が増大することを数量的に見出している²⁸⁾。このEIMD時の筋の振戦および筋電図量の増大の詳細のメカニズムの解明は近年では様々な研究的手法や観点から進められ、この要因は脊髄前角 α 運動ニューロンプールから皮質運動野内まで広く存在することが明らかにされており、EIMDがある時の運動制御機構

は通常の場合とは大きく異なることが示唆された。

一方、片腕の上腕二頭筋でECCをさせた後、ブラインドにした被験者に損傷側を健側と同じ肘関節角度にするように指示すると、損傷側の関節角度は、健側に比して浅くなる。また、同じように、損傷側において、ビジュアルフィードバックを与えている健側と同じ筋力発揮をするように指示すると、損傷側の筋力は健側に比して弱くなる。これらのことは、筋出力発揮時に努力感と実際に発揮された筋力間に誤差が生じることを示唆する^{13, 14, 15, 34)}。このECC後の力発揮感覚の変化については、Proskeらのグループが精力的に研究を行っており、この現象はCONの後には認められなかったため、EIMDは力発揮感覚などの運動感覚にも影響を及ぼすことが明らかにされた¹⁵⁾。この筋長や筋の発揮張力および関節の位置覚などの運動感覚には、ゴルジ腱器官や筋紡錘の働きが非常に重要な役割を果たしていることは明白であるが、Gregoryらは、実験動物を用いてECC後も筋の出力を感知するこれらの器官の活動は正常であったことを報告している^{35, 36)}。従って、このECC後の力発揮の誤差は末梢の感覚受容器の変化によるものではなく、主に中枢神経系内機序の変化によるものであると考えられる¹⁵⁾。その一因として、随伴発射や遠心性コピーなどの中枢機序や皮質運動野の興奮性の変化が挙げられているが¹⁵⁾、この詳細なメカニズムについては未だ明らかにされておらず、今後の重要な研究課題となろう。

4. 運動学習

ヒトは運動を繰り返すことで、その運動を学習し、運動技能が向上したり、新たな運動技能を習得する。この運動の反復による学習は、体育・スポーツだけでなく、運動機能の回復を狙いとするリハビリテーション医学においても重要である。最近、著者らは、ECCによってEIMDが引き起こされた状態の運動学習効果について検討を加えた¹⁶⁾。被験者は、オシロスコープに表示された0から20% MVCの間を複雑に変動する指標に対して、自己の発揮筋力を示すラインを巧みに調整させて、トレースする運動学習課題を計60回繰り返し行った(図2 A)。ECCの前後ともに、この運動学習課題中には

目標と発揮筋力間の絶対誤差および活動筋の筋電図量は減少し、運動が学習される傾向が認められたが、最終的にはこの絶対誤差と活動筋の筋電図量は、ECC前に比して、ECC後で有意に大きかった(図2 B)。このことは、伸張性運動後の筋損傷は運動学習を阻害する可能性を示唆する。この要因の一つとして、前述のように運動学習課題中の主働筋である第一背側骨間筋(FDI)の筋電図量がECC前に比較してECC後で増大することが推察され、このようにECC後に力制御機構が大きく変調されたことが運動学習効果を干渉し、その効果を減弱させていた可能性が示唆された。また、この研究において著者らはTMSによって得られた運動誘発電位をECCの前後で比較し、皮質脊髄路の興奮性の増大および皮質内抑制の減弱も運動学習効果を低下させる一因であろうと考えている^{16, 32)}。しかしながら、前述のようにEIMDの際の最大下筋収縮においては、皮質脊髄路だけでなく、脊髄前角 α 運動ニュー

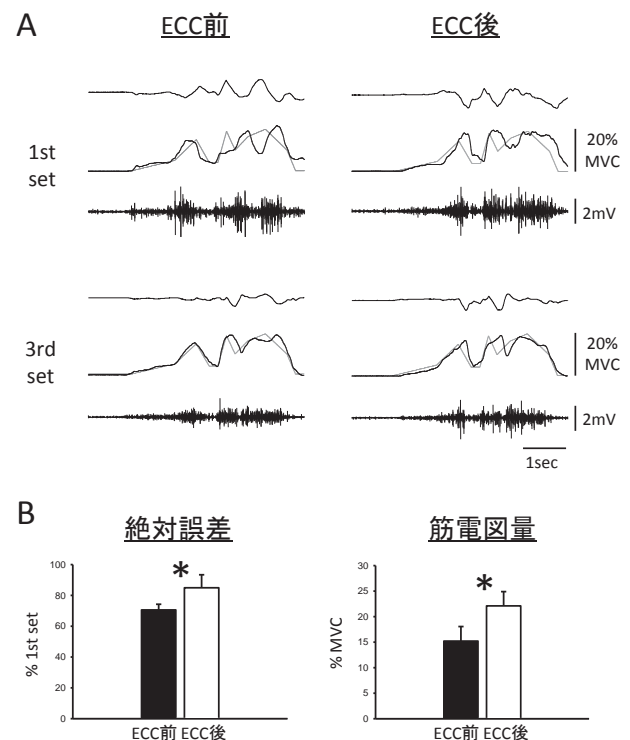


図2 A. ECC前後における運動学習課題の変化。最上段は目標と発揮筋力の誤差、中段の黒線は発揮筋力、灰色線は目標、最下段は第一背側骨間筋(FDI)の筋電図量を示す。B. ECC前後における運動学習課題による第3セット後半の絶対誤差(左)およびFDIの筋電図量。文献16より一部改変。

ロンの活動や力発揮感覚の変化など多くの運動制御機序にも変化が認められるため、EIMDが運動学習効果を減弱させるその主たる要因は不明である。運動学習の研究は、運動・スポーツにおける新たな技能の獲得とリハビリテーションにおける運動機能の回復に非常に重要であるため、その詳細な機序を解明する研究が待たれている。

5. 両側同時運動

これまで述べてきたようにEIMDによる運動機能低下については、ほとんどが損傷した筋を含む片側の肢のみの運動でなされてきた。しかしながら、椅子に座る、両手で物を持ち上げる、バスケットボールのチェストパス、平泳ぎ、およびベンチプレスなどに見られるようにヒトの運動・スポーツ動作においては両側肢を同時に動かすことが非常に多い。ヒト大脳の左右半球が脳梁を介してお互いに投射する経路が確認されており、両側肢を用いる運動では半球間抑制によって両側の運動野がそれぞれ制御されることは広く知られている^{37,38)}。従って、片手の筋に損傷がある場合、両手を同時に動かす両側手同時運動は、これまで述べてきたようにEIMDによって修飾された片側の運動制御機構が、大脳半球間抑制などによって反対側の運動制御機構にも何らかの影響を与える可能性がある。そこで最近、著者らは片手に引き起こしたEIMDが両側手同時のMVC発揮に与える影響について検討を加えた³⁹⁾。

片手のFDIにEIMDを引き起こすECCの前およびECCの疲労より回復するその約2時間後に、片手および両手同時の精密把持によるMVC発揮を行った。その結果、片側で発揮する力よりも両側で発揮する力が低下する両側性機能低下の度合いを表すBilateral index $[100 \times (\text{片手発揮の右手のMVC} + \text{片手発揮の左手のMVC}) / (\text{両手同時発揮の右手のMVC} + \text{両手同時発揮の左手MVC}) - 100]$ はECC前に比してECC後で有意に低下した。また、この時、損傷側だけでなく、EIMDのない側の手のMVCにも有意な低下が認められた。これらのことは、片側のEIMDは両手同時のMVCを低下させること、さらにはEIMDのない側のMVCも低下させること、すなわち両側性機能低下が大きくなること

を示唆する。両側手の同時MVC発揮においては、脳梁を介して左右半球の反対側の皮質運動野に対してそれぞれ抑制の入力が入る半球間抑制が主な原因となって、片側のみのMVC発揮よりも出力が劣ることが考えられている^{40,41)}。従って、片側の筋にEIMDがある場合は、何らかの理由で半球間抑制が強まり、その結果として、両側手同時運動中に反対側の筋の出力も低下させる可能性が示唆される。しかしながら、EIMDが半球間抑制の神経回路に対してどのような機序で修飾するのかなど、その詳細なメカニズムについては明らかにされていないので、電気生理学的手法などを用いて詳細に検討することが今後必要となろう。

6. まとめ

近年の研究により、EIMD自体が様々な運動機能の低下を引き起こすことが示唆されている。この要因としては、末梢性の要因以外にも中枢性の要因も大きな役割を果たしていると考えられ、電気生理学を中心とした様々な方法を用いることで、この生理的機序について徐々に解明されてきている^{10,16,24,30-33)}。しかし、この変化が具体的にどのような中枢への信号によって引き起こされているかなどについては未だ特定されておらず、この詳細なメカニズムの解明が今後の最重要課題と考えられる。DOMSが運動機能に与える影響を検討している研究では、スポーツ動作や日常動作に近い動的な運動について評価しているものはあるが、本総説で取り上げたEIMDと運動機能に関する研究のほとんどが現時点では単関節運動を用いた基礎的な運動であった。従って、今後は多関節運動、さらには日常生活やスポーツ活動、およびリハビリテーション治療などにみられるような動的運動を研究の対象とした解析が必要となろう。

著者らが研究対象とするEIMDは、通常の状態では見られない様々な運動機能の低下を引き起こすため、EIMDがある状態で運動やスポーツなどを行う際に十分な注意を払わないと思いがけない怪我や事故に繋がる可能性が考えられる。先行研究によるとECCでは、瞬発的な力発揮をするタイプII筋線維が主に大きな損傷を受けることが報告されている^{42,43)}。

ゆえに、EIMDは、瞬発的かつ大きな力を出すことが多いスポーツ動作に大きな影響を与えることが推察される。著者らの論文で扱ったEIMDおよびDOMSは一般的に軽視される傾向があり、このような状態においても運動・スポーツを中止することなく行われることがほとんどである⁵⁾。しかし、体育・スポーツやリハビリテーションにおいてはEIMDを引き起こすECCの扱い方に十分な配慮をすることで、このような場面での怪我や事故を防ぐことが可能になる。DOMSおよびEIMDの大きな特徴として、一度経験すると、2回目以降はその損傷度が大幅に低下する「繰り返し効果」があることが報告されている²⁻⁴⁾。この繰り返し効果は、最初の損傷度の大小にほとんど関係なく約6か月程度続くことが明らかにされている⁴⁾。従って、この繰り返し効果を上手に活用して、突然ECCを含むような激しい運動をすることなく、事前に運動に慣れる期間を設けて軽いEIMDを経験しておくことで、その後の大きなEIMDを回避することが可能となる。しかしながら、この繰り返し効果を用いてもEIMDが全く生じなくなるわけではない。また繰り返し効果が運動機能の低下を防ぐことができるかどうかについては予防医学上未だ不明な点が多い⁴⁵⁾。

また、ECCの一つの特徴としてCONに比してより大きな筋肥大を引き起こすことが知られている⁴⁾。このことより一部にはEIMDおよびDOMSを引き起こさないと筋は成長しないという風潮もあるが、これらをほとんど引き起こさないCONのみのトレーニングでも十分な筋力増大や筋肥大を引き起こすことが可能であり、このEIMDは筋力増大および筋肥大に必須条件ではない⁴⁾。これまで述べてきたように、EIMDによって運動は様々な影響を受け、それらはいずれもネガティブなものであり、この運動機能の低下により予期しない怪我に繋がる可能性がある。著者らの行ったアンケート調査では、約半数の対象者が何らかの情報源（本、テレビ、教員、コーチ、医師など）により、そのEIMDおよびDOMSに関する情報を得ていたが、その正確な原因や特徴に関する質問の正答率が高いものではなかった⁵⁾。従って、本研究で扱ってきたDOMSを含めたEIMDの運動機能に与える影響およびその全般的な特性などに関する最新の知見を研究者は体

育・スポーツの実践現場の指導者や医療従事者に伝え、EIMDおよびDOMSに関する正しい情報が運動を行う全ての人に周知されることが必要であると考えられる。

7. 謝辞

本研究の一部は(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団（平成21年度）、植草学園大学共同研究費（平成24-25年度）、およびJSPS科研費（24700612）の助成を受けて行ったものである。

8. 文献

- 1) Newham DJ. The consequences of eccentric contractions and their relationship to delayed onset muscle pain. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1988; 57: 353-359.
- 2) Proske U, Morgan DL. Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *J Physiol.* 2001; 537: 333-345.
- 3) Clarkson PM, Hubal MJ. Exercise-induced muscle damage in humans. *Am J Phys Med Rehabil.* 2002; 81: S52-69.
- 4) Nosaka K, Lavender A, Newton M, Sacco P. Muscle damage in resistance training; Is muscle damage necessary for strength gain and muscle hypertrophy? *Int J Sport Health Sci.* 2003; 1: 1-7.
- 5) 遠藤隆志, 小宮山伴与志. 大学生における遅発性筋痛の経験と科学的知識に関する調査結果. *千葉体育学研究.* 2006; 30: 9-17.
- 6) Allen DG. Eccentric muscle damage: mechanisms of early reduction of force. *Acta Physiol Scand.* 2001; 171: 311-319.
- 7) Morgan DL, Allen DG. Early events in stretch-induced muscle damage. *J Appl Physiol.* 1999; 87: 2007-2015.
- 8) Proske U, Allen TJ. Damage to skeletal muscle from eccentric exercise. *Exerc Sport Sci Rev.* 2005; 33: 98-104.
- 9) Schoenfeld BJ. Does exercise-induced muscle damage play a role in skeletal muscle hypertrophy? *J Strength Cond Res.* 2012; 26: 1441-1453.
- 10) Endoh T, Nakajima T, Sakamoto M, Komiyama T. The effects of muscle damage induced by eccentric exercise on muscle fatigue. *Med Sci Sports Exerc.* 2005; 37: 1151-1156.
- 11) Semmler JG, Ebert SA, Amarasekera J. Eccentric muscle damage increases intermuscular coherence during a fatiguing isometric contraction. *Acta Physiol.* 2013;

- 208:362-375.
- 12) Semmler JG, Tucker KJ, Allen TJ, Proske U. Eccentric exercise increases EMG amplitude and force fluctuations during submaximal contractions of elbow flexor muscles. *J Appl Physiol.* 2007; 103: 979-989.
 - 13) Saxton JM, Clarkson PM, James R, Miles M, Westerfer M, Clark S, Donnelly AE. Neuromuscular dysfunction following eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 1995; 27: 1185-1193.
 - 14) Weerakkody N, Percival P, Morgan DL, Gregory JE, Proske U. Matching different levels of isometric torque in elbow flexor muscles after eccentric exercise. *Exp Brain Res.* 2003; 149: 141-150.
 - 15) Proske U, Gregory JE, Morgan DL, Percival P, Weerakkody NS, Canny BJ. Force matching errors following eccentric exercise. *Hum Mov Sci.* 2004; 23: 365-378.
 - 16) 遠藤隆志, 小川哲也, 中澤公孝. 伸張性筋収縮による筋損傷が運動学習に与える影響とその神経生理学的要因. *デサントスポーツ科学.* 2010; 31: 167-175.
 - 17) Lund JP, Donga R, Widmer CG, Stohler CS. The pain-adaptation model: a discussion of the relationship between chronic musculoskeletal pain and motor activity. *Can J Physiol Pharmacol.* 1991; 69: 683-694.
 - 18) Sohn MK, Graven-Nielsen T, Arendt-Nielsen L, Svensson P. Inhibition of motor unit firing during experimental muscle pain in humans. *Muscle Nerve.* 2000; 23: 1219-1226.
 - 19) Graven-Nielsen T, Svensson P, Arendt-Nielsen L. Effects of experimental muscle pain on muscle activity and coordination during static and dynamic motor function. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1997; 105: 156-164.
 - 20) Graven-Nielsen T, Lund H, Arendt-Nielsen L, Danneskiold-Samsøe B, Bliddal H. Inhibition of maximal voluntary contraction force by experimental muscle pain: a centrally mediated mechanism. *Muscle Nerve.* 2002; 26: 708-712.
 - 21) Jones DA, Newham DJ, Torgan C. Mechanical influences on long-lasting human muscle fatigue and delayed-onset pain. *J Physiol.* 1989; 412: 415-427.
 - 22) Nosaka K, Newton M, Sacco P. Delayed-onset muscle soreness does not reflect the magnitude of eccentric exercise-induced muscle damage. *Scand J Med Sci Sports.* 2002; 12: 337-346.
 - 23) Warren GL, Lowe DA, Armstrong RB. Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med.* 1999; 27: 43-59.
 - 24) Prasartwuth O, Allen TJ, Butler JE, Gandevia SC, Taylor JL. Length-dependent changes in voluntary activation, maximum voluntary torque and twitch responses after eccentric damage in humans. *J Physiol.* 2006; 571: 243-252.
 - 25) 遠藤隆志, 中島 剛, 坂本将基, 塩澤伸一郎, 小宮山伴与志. 高張食塩水の筋内注入による実験的筋痛が最大筋力発揮中の筋疲労の発現に与える影響. *体力科学.* 2006; 55: 269-278.
 - 26) Endoh T, Yoneda T, Saga N, Sasada S. Effect of muscle damage induced by eccentric exercise on corticospinal excitability and cortical inhibition. *Adv Exerc Sports physiol.* 2008; 14: 97
 - 27) Lavender AP, Nosaka K. Changes in fluctuation of isometric force following eccentric and concentric exercise of the elbow flexors. *Eur J Appl Physiol.* 2006; 96: 235-240.
 - 28) Endoh T, Saga N, Ushiba J, Tsuchiya M, Yoneda T. Corticomuscular coherence immediately after eccentric and concentric exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2009; 41: 354.
 - 29) Leger AB, Milner TE. Motor impairment in the human hand following eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2001; 84: 213-220.
 - 30) Dartnall TJ, Nordstrom MA, Semmler JG. Motor unit synchronization is increased in biceps brachii after exercise-induced damage to elbow flexor muscles. *J Neurophysiol.* 2008; 99: 1008-1019.
 - 31) Dartnall TJ, Rogasch NC, Nordstrom MA, Semmler JG. Eccentric muscle damage has variable effects on motor unit recruitment thresholds and discharge patterns in elbow flexor muscles. *J Neurophysiol.* 2009; 102: 413-423.
 - 32) 遠藤隆志, 中澤公孝. 伸張性筋収縮による筋損傷が皮質内抑制機構に与える影響. *植草学園大学研究紀要.* 2012; 4: 37-42.
 - 33) Pitman BM, Semmler JG. Reduced short-interval intracortical inhibition after eccentric muscle damage in human elbow flexor muscles. *J Appl Physiol.* 2012; 113: 929-936.
 - 34) Brockett C, Warren N, Gregory JE, Morgan DL, Proske U. A comparison of the effects of concentric versus eccentric exercise on force and position sense at the human elbow joint. *Brain Res.* 1997; 771: 251-258.
 - 35) Gregory JE, Brockett CL, Morgan DL, Whitehead NP, Proske U. Effect of eccentric muscle contractions on Golgi tendon organ responses to passive and active tension in the cat. *J Physiol.* 2002; 538: 209-218.
 - 36) Gregory JE, Morgan DL, Proske U. Responses of muscle spindles following a series of eccentric contractions. *Exp Brain Res.* 2004; 157: 234-240.

- 37) Ferbert A, Priori A, Rothwell JC, Day BL, Colebatch JG, Marsden CD. Interhemispheric inhibition of the human motor cortex. *J Physiol.* 1992; 453: 525-546.
- 38) Meyer BU, Röricht S, Gräfin von Einsiedel H, Kruggel F, Weindl A. Inhibitory and excitatory interhemispheric transfers between motor cortical areas in normal humans and patients with abnormalities of the corpus callosum. *Brain.* 1995; 118: 429-440.
- 39) Endoh T, Saito K. Effect of unilateral muscle damage induced by eccentric contractions on bilateral deficit. *Adv Exerc Sports physiol.* in press.
- 40) Ohtsuki T. Decrease in human voluntary isometric arm strength induced by simultaneous bilateral exertion. *Behav Brain Res.* 1983; 7: 165-178.
- 41) Ohtsuki T. Change in strength, speed, and reaction time induced by simultaneous bilateral muscular activity. In: Swinnen S. et al. (eds.) *Interlimb coordination: neural, dynamical, and cognitive constraints.* Academic Press (New York) . 1994; 259-274.
- 42) Vijayan K, Thompson JL, Norenberg KM, Fitts RH, Riley DA. Fiber-type susceptibility to eccentric contraction-induced damage of hindlimb-unloaded rat AL muscles. *J Appl Physiol.* 2001; 90: 770-776.
- 43) Fridén J, Sjöström M, Ekblom B. Myofibrillar damage following intense eccentric exercise in man. *Int J Sports Med.* 1983; 4: 170-176.
- 44) Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. How long does the protective effect on eccentric exercise-induced muscle damage last? *Med Sci Sports Exerc.* 2001; 33: 1490-1495.
- 45) Dartnall TJ, Nordstrom MA, Semmler JG. Adaptations in biceps brachii motor unit activity after repeated bouts of eccentric exercise in elbow flexor muscles. *J Neurophysiol.* 2011; 105: 1225-1235.

Effect of Muscle Damage Induced by Eccentric Exercise on Motor Function: A Brief Review

Takashi ENDOH^[1]

Faculty of Development and Education, Uekusa Gakuen University

Kiichiro SAITO^[2]

Faculty of Health Sciences, Uekusa Gakuen University

Eccentric exercise, which involves lengthening contractions, damages skeletal muscle tissue and results in delayed onset muscle soreness (DOMS) within a few hours. The muscle damage induced by eccentric exercise (EIMD) triggers not only DOMS and swelling but also decreases maximal voluntary contraction (MVC) force and range of motion. Various motor functions and neuromuscular mechanisms in humans are affected by EIMD. The following recent findings showed a relationship between EIMD and a decrease in motor function and are discussed in this study to clarify the effect of EIMD on motor function: (a) MVC and sustained MVC, (b) submaximal voluntary contractions and force matching errors, (c) motor learning, and (d) bilateral contractions. Further studies are needed to clarify the mechanisms of decreased motor function due to EIMD to prevent accidental injury in sport activity and rehabilitation.

Keywords: muscle damage, eccentric exercise, motor function, voluntary contraction, motor control

[1] Takashi ENDOH

[2] Kiichiro SAITO